

LOS PROCESOS DE DETERIORO EN EL HORMIGON Y SU RELACIÓN CON LA FORMACION DE ETTRINGITA DIFERIDA

Batic¹, O. R.; C. A. Milanesi²; P. J. Maiza³ y S. A. Marfil⁴

Laboratorio de Entrenamiento Multidisciplinario para la Investigación Tecnológica (LEMIT-CIC). Calle 52 entre 121 y 122. La Plata (1900). FAX: 021-250471

Dpto. de Geología. Universidad Nacional del Sur.
San Juan 670. Bahía Blanca (8000). FAX: 091-556756

RESUMEN

La detección de ettringita en hormigones afectados por algún tipo de deterioro prematuro, ha sido motivo de preocupación por numerosos investigadores en los últimos años. Se han definido dos líneas principales de enfoque del tema. Una la considera como factor principal de la destrucción y la otra asume que su aparición es posterior al hecho precursor.

Con la finalidad de contribuir a esclarecer este fenómeno, se proyectó una investigación tendiente a cubrir los aspectos antes citados.

En este trabajo se informan las conclusiones obtenidas hasta la fecha, de estudios realizados sobre hormigones que han sido afectados por diferentes mecanismos destructivos, como congelamiento y deshielo, humedecimiento y secado, prefisuración y RAS. Se realizaron observaciones microscópicas, DRX, SEM, EDAX, estabilidad dimensional, porosidad y resistencia mecánica.

La formación de ettringita en la mayoría de los casos estuvo vinculada a la existencia de circulación de líquido en la masa del hormigón pero sin definir claramente su participación en los procesos de destrucción.

(1) Investigador Principal CIC-LEMIT. Docente UNLP. Profesor UTN Reg. La Plata.

(2) Becario CIC-LEMIT. Docente UNLP

(3) Investigador Independiente CONICET. Profesor UNS.

(4) Investigador Adjunto CIC. Docente UNS.

INTRODUCCION

Como es bien sabido, el trisulfoaluminato de calcio hidratado ($C_3S.C_3A.H_{32}$), comúnmente conocido con el nombre de ettringita ($C_6AS_3H_{32}$), es un constituyente normal de los cementos portland hidratados dentro del hormigón. En efecto, durante las primeras etapas de hidratación del cemento (principalmente durante las primeras 24 horas), el aluminato tricálcico (C_3A) contenido en el clinker reacciona en solución acuosa con el yeso ($CaSO_4.2H_2O$), presente en el ligante a fin de regular la velocidad de hidratación del primero, para dar lugar a la formación de ettringita (Eq. 1), mineral de características metaestables y estructura cristalina bien definida (1).



Posteriormente, bajo condiciones normales de hidratación (curado húmedo a temperatura ambiente), es habitual que buena parte de esta ettringita se transforme en un monosulfoaluminato de calcio hidratado (Eq. 2), considerado como el producto de hidratación final del C_3A , dependiendo esta última transformación, además, de la influencia favorable de una multiplicidad de factores intervinientes (SO_4/AC_3 , alcalinidad de la solución de poros, relación agua/cemento, etc.) (2,3,4).



Cuando el hormigón se encuentra inmerso en un ambiente de alta concentración de iones sulfato, como es el caso, por ejemplo, de las estructuras en contacto con el agua de mar o suelos salinos, el monosulfoaluminato de calcio reacciona con los iones SO_4^{2-} presentes en el medio, conjuntamente con el hidróxido de calcio (CH) contenido en la pasta de cemento hidratada, para dar origen a la formación de ettringita secundaria (denominada así para diferenciarla de la ettringita primaria proveniente de la hidratación del cemento), de acuerdo con la siguiente reacción (1,2) (Eq. 3):



Como se sabe, la formación de esta ettringita secundaria en los sistemas cementicios se produce bajo la acción de un conjunto de reacciones químicas muy complejas (5,6), las que bajo determinadas condiciones hacen que su cristalización posea características expansivas y destructivas para el hormigón, constituyéndose en el fenómeno comúnmente conocido con el nombre de "ataque por sulfatos" (7).

Es factible, sin embargo, hallar también importantes cantidades de ettringita secundaria en hormigones afectados por otros tipos de patologías (RAS, congelación y deshielo, etc.) (8), aún hallándose alejados del contacto de toda fuente externa de aporte de iones sulfato, hecho que ha incorporado una gran confusión en el tema, motivando una gran número de investigaciones al respecto (9-13).

Dentro de esta vasta problemática, la formación de ettringita diferida (delayed ettringite formation) merece una consideración especial. El término "ettringita diferida"

a, aparece en la literatura a comienzos de la década del '80 para explicar los deterioros ocurridos en estructuras de hormigón premoldeadas curadas a vapor, presumiblemente debidos a la formación de importantes cantidades de ettringita secundaria en fisuras e interfases matriz-agregado, a pesar de tratarse de ambientes externos carentes de iones sulfato (14).

Las investigaciones realizadas en este tema sugieren que la explicación de este fenómeno radica en la fuerte competencia que existe entre el silicato de calcio hidratado (C-S-H) y los productos de hidratación del C_3A en las primeras edades. por la captación de los sulfatos contenidos en la solución de poros del hormigón, con resultado positivo a favor del primero a medida que se eleva la temperatura de curado de éste (15,16), ocupando un papel decisivo en todo este proceso, la existencia de fisuras y los procesos de difusión dentro del material (17).

Estudios posteriores, no obstante, indican que la formación de ettringita diferida puede presentarse aún en los hormigones con curado normal debido a la mineralogía particular del cemento (12). Asimismo, estos estudios han mostrado que buena parte de la ettringita detectada es de naturaleza amorfa o submicroscópica y de apariencia similar al gel formado por la RAS (18), lo que ha llevado a confundir las patologías originadas por estos fenómenos (9-12,19).

En este trabajo se presentan resultados obtenidos en estudios de laboratorio realizados hasta los 2 años de edad sobre probetas de hormigón afectadas por diferentes mecanismos de degradación (RAS, congelación y deshielo, humedecimiento y secado, acciones mecánicas), con el propósito de arrojar algo de luz a esta problemática. Se informan valores de resistencia mecánica del hormigón (módulo de rotura), estabilidad dimensional y las observaciones realizadas en el material a nivel microestructural mediante microscopía óptica y SEM, complementadas mediante la identificación mineralógica de los productos de alteración a través de DRX y EDAX.

MATERIALES, MEZCLAS Y ESTACIONAMIENTO DE PROBETAS

Con la finalidad de elaborar las mezclas de hormigón destinadas a estudiar la formación de ettringita diferida (DEF) se seleccionaron los materiales adecuados, teniendo en cuenta los antecedentes bibliográficos existentes (19). Se utilizaron dos cementos portland con características físicas y químicas que figuran en la Tabla N 1. El cemento portland normal tiene un contenido de $SO_3 = 2.0 \%$ y la relación $SO_3/Al_2O_3 = 0.32$, mientras que en el cemento portland de alta resistencia inicial (ARI) estos valores son $SO_3 = 2.8 \%$ y $SO_3/Al_2O_3 = 0.70 \%$.

Como agregado grueso se utilizó una roca granítica gris procedente de Tandil y como agregado fino una arena del Río de la Plata, conocida como "oriental", de módulo de finura igual a 3.0, ambos lavados y no reactivos frente a los álcalis, comprobado a través de ensayos previos.

Además, cuando fue necesario disponer de un agregado potencialmente

reactivo se reemplazó un 10 % en peso de la arena natural por igual cantidad y granulometría de una arenisca silíceas triturada, de gran reactividad alcalina, utilizada en experiencias previas (20).

La dosificación del hormigón se compone de 480 Kg. de cemento y una proporción cemento:agregado 3.39. Se usó una razón agua-cemento igual a 0.44 y un asentamiento medido en el tronco de cono de Abrams de 12.0 ± 1.0 cm.

Con estas mezclas se moldearon tres probetas de 4x4x16 cm por ensayo y por edad, más algunas suplementarias para hacer otras determinaciones. Se las dejaron en los moldes 24 horas en cámara húmeda; luego se desmoldaron y se pusieron 14 días en agua saturada con cal a las que correspondía; a las que contenían agregados reactivos luego de desmoldadas se las midió y se colocaron dentro de bolsas plásticas cerradas y estacionadas a 23°C dentro de la cámara húmeda. A los 14 días de moldeadas las probetas fueron divididas en grupos de tres para continuar con los siguientes tratamientos:

Grupo 1 (P). Probetas patrón. Se las dejó bajo agua con cal hasta la edad de ensayo (1 a 2 años).

Grupo 2 (PF). Probetas prefisuradas. Se le aplicó a cada probeta una carga a flexión del orden del 80 % del valor de la carga de rotura, estimado en base a probetas gemelas. El objetivo fue provocar un estado de fisuración interno.

Grupo 3 (CD). Las probetas fueron sometidas a ciclos de congelación en aire y deshielo en agua (saturada con cal), con temperaturas desde + 20°C hasta - 20°C aproximadamente, hasta completar los 420 ciclos.

Grupo 4 (HS). Las probetas fueron sometidas a 120 ciclos de humedecimiento en agua saturada de cal y secado a 38°C.

Grupo 5 (RAS). El motivo del estudio de este grupo era observar la influencia que produce la RAS sobre la formación de la DEF. Estas probetas contenían un agregado fino reactivo frente a los álcalis, se mantuvieron en bolsas plásticas con humedad a 23°C durante todo el período.

Tabla N 1: Características físico-químicas de los cementos portland utilizados

Propiedad físicas	Cemento ARI	CPN
Finura (Ret. S/T 75 μm) (%)	0.8	4.4
Sup. Esp.(Blaine) (m^2/kg)	459	311
Tiempo de fraguado inicial	2:25	1:25
Tiempo de fraguado final	3:20	2:45
Expansión en autoclave (%)	0.00	0.17
Resistencia a flexión a 7días (MPa)	8.8	6.2
Resistencia a flexión a 28días (MPa)	9.2	7.3
Resistencia a compresión a 7días (MPa)	44.4	29.2
Resistencia a compresión a 28 días (MPa)	55.4	46.0
Análisis químico		
Residuo insoluble (%)	0.21	1.98
Pérdida por calcinación (%)	2.04	1.30
Anhídrido sulfúrico (SO_3) (%)	2.8	2.0
Oxido de magnesio (MgO) (%)	0.48	3.6
Oxido de silicio (SiO_2) (%)	21.8	21.6
Oxido de hierro (Fe_2O_3) (%)	4.6	3.7
Oxido de aluminio (Al_2O_3) (%)	4.0	6.2
Oxido de calcio (CaO) (%)	62.9	58.0
Cal libre (CaO) (%)	-	-
Oxido de sodio (Na_2O) (%)	0.16	0.60
Oxido de potasio (K_2O) (%)	1.03	0.82
Cloruros Cl (%)	0.005	-
Alcalis total (%)	0.84	1.14

RESULTADOS OBTENIDOS

Sobre las probetas acondicionadas según lo descrito en el párrafo anterior se determinó la variación longitudinal y de masa en el tiempo y, además, a la edad de 1 y 2 años, se determinó la resistencia a flexión (módulo de rotura) con carga central y se realizaron observaciones a nivel microestructural mediante microscopía óptica, DRX, SEM y EDAX. Para ello se utilizó un estereomicroscopio Olympus SZ40 trinocular, un difractómetro de rayos X Rigaku, D-max IIIC, computarizado con radiación de Cu y monocromador de grafito, con 35 Kv y 15 mA y un microscopio electrónico de barrido JEOL JSM 35 CP, equipado con sonda EDAX DX 4, de ventana ultradelgada con un rango de análisis elemental desde Z = 5(B) hasta Z = 92 (U), respectivamente.

En la tabla N 2 se muestran los valores de las expansiones y del módulo de rotura (MR) de los hormigones conservados en diferentes condiciones de exposición.

Tabla N 2: Resultados de la expansión y el módulo de rotura

Grupo	Cemento	Expansión (%)		Módulo de rotura (MPa)	
		12 m	24 m	24 m	% del patrón
P	Normal	0.030	0.050	10.2	100
PF		0.036	0.038	9.9	97
CD		0.229	0.745	1.6	15
HS		0.059	0.144	8.1	80
RAS		0.452	0.475	4.9	48
P	ARI	0.018	0.029	10.5	100
PF		0.022	0.006	11.0	104
CD		0.045	0.096	8.2	77
HS		0.001	0.026	9.6	91
RAS		0.434	0.449	6.0	57

Los resultados mostrados en la tabla N 2 permiten observar que a medida que la expansión es mayor es más notable la caída de resistencia a flexión como es de esperar. Estos porcentajes son mayores cuando se utiliza CPN lo cual indica una microestructura más débil.

Los resultados son coherentes utilizando los dos tipos de cemento, excepto en el caso del tratamiento de congelación y deshielo, pues usando el cemento portland normal, se observaron deterioro más intenso con degradación superficial, mayor incremento de las expansiones y mayor caída de la resistencia que con los hormigones conteniendo cemento portland ARI. Existen antecedentes en los cuales se vincula este mejor comportamiento inicial con el mayor desarrollo de las reacciones de hidratación y de la resistencia mecánica inicial.

Observaciones con estereomicroscopio:

Para realizar esta parte del estudio se tomaron mitades de probetas ensayadas previamente a flexión, tratando de evitar el contacto con el aire y un secado muy rápido o intenso. Previamente a las observaciones se cortó la probeta en varias secciones con el fin de tener un panorama amplio de la estructura interior del hormigón.

Hormigones con cemento portland normal:

P1: A la edad de 18 meses la probeta se presentó sana, los clastos limpios y sin indicios de reacción. Es abundante la presencia de portlandita (Ca(OH)_2). A los 24 meses las características fueron similares, aunque las cavidades formadas por aire

entraí do estaban rellenas con portlandita y en algunos casos por ettringita. Los cristales de esta última son asciculares y muy finos.

PF1: A los 18 meses, asociada con portlandita, se observó ettringita en el interior de cavidades. A diferencia de la probeta patrón, en ésta los cristales de ettringita eran cortos y más gruesos y se agrupaban formando ramilletes. A los 24 meses fue notable el desarrollo de la ettringita. Presentó las mismas características morfológicas que a los 18 meses, además apareció en algunos contactos entre el agregado grueso y la pasta. Se observó microfisuramiento en ambos casos.

HS1: Presentó características similares a la PF1. A los 18 meses, se observó ettringita en ramilletes asociada a portlandita, sin deterioro. A los 24 meses la ettringita en forma de ramilletes, se encontró en las cavidades de mayor tamaño y asociada con portlandita, mientras que las cavidades pequeñas contenían ettringita en forma de agujas muy finas.

CD1: La probeta a los 18 meses se encontraba sana. No se observó ettringita. A los 24 meses estaba totalmente deteriorada, la pasta era deleznable y los clastos del agregado grueso se presentaron en algunos casos separados de la pasta. Se observó un borde de reacción entre los clastos del agregado fino y la pasta. Era abundante el carbonato de calcio en la pasta, inclusive los clastos del agregado grueso estaban cubiertos por una delgada capa de carbonato. No se observó ettringita. La portlandita en el interior de las cavidades, era abundante.

RAS: Se observó intenso fracturamiento, con escalonamiento y desplazamiento de las partes y manchas y exudados en la superficie de la probeta. Era abundante la portlandita. A los 18 meses no se observó la presencia de ettringita. Son claros los fenómenos de reacción. Hay fisuramiento en la pasta y los clastos del agregado grueso están sueltos. Los clastos de la arenisca están cubiertos por un material blanco. A los 24 meses presentó características similares, solo que la ettringita era muy abundante tanto en forma de finas agujas como de cristales cortos formando ramilletes. La superficie de los agregados gruesos estaba cubierta por carbonato de calcio y ettringita.

Hormigones con cemento portland de alta resistencia inicial:

P2: A los 18 meses la probeta se presentó sana, con los clastos limpios, solo se observó la presencia de portlandita. A los 24 meses las características fueron las mismas, aunque apareció escasa ettringita, relleno de las cavidades formadas por aire atrapado, asociada con portlandita, la que predominaba ampliamente.

PF2: Se observaron fracturas en la superficie, delgadas y a veces con cementación. En el interior de las cavidades se observó ettringita asociada a portlandita. Los cristales se desarrollaron formando ramilletes, cortos y gruesos. Estas características se observaron en las probetas a los 18 y 24 meses.

HS2: A los 18 meses no se observó ettringita. Era abundante la portlandita. A los 24 meses se identificó ettringita en forma de cristales muy pequeños agrupados en ramilletes que tapizan las paredes de las cavidades. En ambos casos la probeta se

presentó sana.

CD2: A los 18 meses la probeta se encontró sana. A los 24 meses, tenía algo de deterioro aunque no tan marcado como en la probeta con cemento normal. No se observó ettringita en ninguno de los dos casos.

RAS2: A los 18 meses no se observó ettringita, era abundante la portlandita y el desarrollo de fenómenos de reacción. A los 24 meses fue notable el desarrollo de la reacción álcali - sílice. Los clastos de la arenisca estaban recubiertos por un material duro y blanco. Era abundante el carbonato de calcio, portlandita y ettringita, tanto en las cavidades como sobre la superficie de los agregados gruesos. La ettringita se desarrolló en cavidades formando cristales cortos y gruesos

Estudios mediante difracción de rayos X:

Los estudios se llevaron a cabo tratando de separar el mortero y eliminando la mayor cantidad posible de agregado, esta tarea no es sencilla, luego se molieron las muestras a polvo, utilizando las partículas que pasan el tamiz IRAM 0.150 mm (Nº 100).

Mediante esta metodología no fue posible identificar ettringita en ninguna de las probetas, ello se debe a la escasa proporción de este producto (menor al 5 %) y a la imposibilidad operativa de separar el agregado fino (partículas finas de arena).

Los exudados y material de relleno de las fracturas, están constituidos principalmente por calcita y portlandita, que se ven incrementados en este estudio por permanecer, cuando es necesario, en agua con cal.

Estudios utilizando SEM - EDAX:

Para realizar esta parte del estudio se tomaron, al igual que en lo descripto anteriormente, trozos de hormigón representativos de cada uno de los grupos estudiados, tratando de ubicar, mediante observaciones ópticas previas, aquellas partes que parecían las más convenientes.

Las probetas así seleccionadas fueron estudiadas y analizadas con un microscopio electrónico de barrido, con el propósito de evaluar el desarrollo de ettringita. Los resultados obtenidos para las edades de 18 y 24 meses se resumen en la tabla N 3.

P: No fue posible identificar ettringita a los 18 meses. A la edad de 24 meses, se observó que en el interior de algunas cavidades formadas por aire entrampado se presentaba en forma de agujas muy finas y largas. La figura 1a es una fotomicrografía obtenida de una probeta del grupo 1 a la edad de 24 meses, donde se observa ettringita (e) desarrollada en el interior de una cavidad formada por aire entrampado, en forma de agujas muy finas y largas, asociada con portlandita (p). La figura 1b corresponde al espectro de EDAX de ettringita, donde se observan los picos de S, Al, Ca y O característicos de este mineral. La elevada magnificación del calcio se debe a la presencia de Ca(OH)_2 .

Tabla N 3: Observaciones de hormigones mediante SEM

Identificación de las probetas	PRESENCIA DE ETTRINGITA			
	Cemento Normal	Cemento de alta resistencia inicial	Cemento Normal	Cemento de alta resistencia inicial
	18 meses		24 meses	
P	No	no	si	si
PF	Si	si	si	si
CD	Si	si	si	si
HS	Si	no	si	no
RAS	No	si	si	si

PF: En todas las probetas apareció ettringita abundante, desarrollada tanto en cavidades, como en zonas de contacto agregado - pasta. En la figura 2 se muestra una fotomicrografía de SEM de la probeta PF2, hormigón con cemento de ARI, a la edad de 24 meses, donde se observa el desarrollo de ettringita (e). El espectro de EDAX fue similar al obtenido para la probeta P1. Se identificó S, Al, O y Ca.

CD: Tanto en las probetas a la edad de 18 como de 24 meses, la cantidad de ettringita fue escasa. Apareció con mayor frecuencia en zonas de fracturas y sobre la superficie de los agregados en forma de cristales cortos y anchos o de forma masiva (figura 3). Los análisis de EDAX determinaron, además de los elementos mencionados en las muestras anteriores, silicio debido al cuarzo del agregado.

HS: Fue notable la gran cantidad de ettringita observada. Los cristales crecieron en el interior de cavidades formando ramilletes. La figura 4a muestra una fotomicrografía de SEM de la probeta HS1, con cemento portland normal, a la edad de 24 meses. La ettringita (e), desarrollada en el interior de cavidades, forma ramilletes. Los cristales son cortos y más gruesos que los observados en la probeta patrón P1, también se observó ettringita masiva. La figura 4b es un detalle de la anterior. Se analizó la ettringita por EDAX determinándose S, Al, Ca y O. El espectro es similar al de la figura 1b.

RAS: Todas las probetas estudiadas presentaron un alto grado de deterioro. Se observaron bordes de reacción en los clastos del agregado grueso. Con excepción de la probeta RAS1 a los 18 meses, la ettringita apareció en forma muy abundante tanto en el interior de cavidades, como en fracturas y en la superficie de los agregados gruesos. Generalmente estaba asociada con calcita y portlandita. En la figura 5a se muestra la ettringita (e) desarrollada en la probeta RAS2 (hormigón con cemento ARI,

a la edad de 18 meses). Se observan cristales de ettringita (e), asociados a portlandita (p). Analizados por EDAX se determinó al igual que en las muestras anteriores S, Al, O, y Ca. Los clastos de la arenisca tienen un producto de reacción en la superficie el que analizado por EDAX permitió identificar Si, Ca, Al, Na, K y O (figura 5b), adjudicado a una ceolita.

CONCLUSIONES

El estudio se inició con la finalidad de observar el desarrollo de la ettringita en el hormigón endurecido, los motivos por los que se forma, si existen zonas preferenciales para su formación (fisuras, poros, interfases) y si es causante de deterioro.

Luego de analizados los resultados obtenidos en dos años de estudios se desprende lo siguiente:

1) Las observaciones realizadas mediante microscopía óptica y electrónica permitieron detectar la formación de dos tipos de ettringita a) primaria de naturaleza cristalina generada durante las primeras edades como consecuencia de los procesos de hidratación del cemento y b) secundaria de morfología variable masiva o cristalina generada a posteriori (6 meses o más) como resultado de la circulación del líquido de poros, de los productos de difusión dentro de la estructura porosa del hormigón y de la evolución de los productos hidratados del cemento sin el aporte externo de iones sulfato.

2) Cuando los espacios disponibles dentro del hormigón son pequeños y mínimos la ettringita desarrolla cristales finos y pequeños; cuando por algún motivo determinado existen fisuras, los cristales tienen mayor desarrollo y en algunas circunstancias se producen ramilletes densos. Esto indicaría que la ettringita cristalina se adecua al espacio disponible sin ejercer acción expansiva.

3) La intensidad de formación depende del origen y composición mineralógica del cemento portland y del grado de deterioro del hormigón. La formación de ettringita en el hormigón depende además del ambiente que rodea a las probetas; es mínima en condiciones permanentemente saturadas, como las patrón o las que han estado sometidas a ciclos de congelación y deshielo y se incrementa con los períodos de secado (concentración de la solución de poros).

4) Los hormigones que presentan la mayor expansión y caída de resistencia no son los que muestran mayor cantidad de ettringita en las observaciones ópticas.

5) Los mecanismos de deterioro que operan en los hormigones afectados por la RAS aparecen vinculados exclusivamente a la formación de geles silíceos de naturaleza expansiva como resultado de la generación de fenómenos osmóticos. La formación de ettringita en estos hormigones no participa de los movimientos expansivos del material; en efecto, mientras que los primeros cristales comienzan a observarse recién a partir de los 6 meses en adelante, la estructura del material ya se encuentra profundamente alterada y su precipitación no contribuye al incremento de las expansiones.

6) Los mecanismos de deterioro que operan en los hormigones afectados por los ciclos de congelación y deshielo se deben sin lugar a dudas y, al menos en parte, a la

con: acción de dos factores: las cristalización del agua por un lado y la aparición de presiones hidráulicas generadas por fenómenos osmóticos. Existen dudas, sin embargo, acerca de la participación de la ettringita masiva que aparece en la zona de interfase matriz-agregado en los procesos de deterioro del material.

7) El proceso de humedecimiento y secado produce elevadas expansiones y fisuración siendo mayor en el caso del cemento portland normal. Aún solo esta manifestación puede ser atribuida a la acción del agua dentro de los poros y fisuras, principalmente en los más pequeños debido a la orientación de los dipolos del agua que generan grandes presiones, la magnitud de los deterioros observados hacen presumir que debería estar involucrada otra acción destructiva, como la provocada por la formación de ettringita diferida. También en este caso se observa la formación de ettringita masiva cuyo rol en la consecuencia de la disrupción no es clara, ni se ha podido cuantificar en este estudio.

REFERENCIAS

- 1) Mehta, P.K., CONCRETE; Structure, Properties, and Material. Prentice-Hall, Inc. 1989 pp. 137.
- 2) Mindess S., Young J.F., CONCRETE. Prentice-Hall, Inc., 1981, pp. 80.
- 3) Massazza, F., Daimon M., "Chemistry of hydration of cements and cementitious system, Proc. 9th congress the chemistry of cement Vol.1, pp 383, New Delhi, India, 1992.
- 4) Uchikawa H., Poc. PK. Mehta Symposium on Durability of concrete, K.H. Khayat and P.C. Aitcin Eds, Nice, France, pp 61, 1992.
- 5) Mehta P.K, Schiessl T., Raupach M. , "Performance and Durability of Concrete Systems" Ibidem 3, pp 571.
- 6) Menashi D, Cohen, B Mather "Sulfate Attack on Concrete Research Needs" , ACI Material Journal, Vol 88, N°1, January-February, 1991, pp 62-28.
- 7) Irassar E.F. "Ataque de sulfatos al Hormigón Adiciones Minerales Activas" N°16, AATH, pp. 21-31, 1986.
- 8) Idorn G.H., Vogn Johansen, Thaulow N. "Research Innovations for durable concrete", Concrete International July 1992. pp. 19-24.
- 9) Oberholster R.E., Maree H., Brand J.H.B. "Cracked prestressed concrete railway sleepers" 9th. ICAAR. London. (U.K). Vol 2 pp. 739-749. 1992
- 10) Brouxel J., Hantzo Q. "Durability of Bridge Affected by an Internal Expansive Phenomenon". 3rd CANMET/ACI Int. Conf. on Durability of Concrete, supplementary Papers, Nice, France, pp 355, 1994.
- 11) Hobbs D.W. "Diagnosis of the cause of cracking in four structures in which ASR is occurring." 10th. ICAAR, Sidney, Australia, pp. 209-218, 1997
- 12) Mielenz R.C., Marusin S.L., Hime W.G. and Dugovic Z. "Investigation of prestressed concrete railway tie distress", Concrete International, Dec. 1995, pp. 62-68.
- 13) Idorn G.M., Skalny J. Discussion 89-M50/ From sept.-oct. 1992. ACI Materials Journal, pp.469. ACI Materials Journal, July.- August. 1993. pp.383- 385
- 14) Heinz D., Ludwigu. "Mechanisms of secondary ettringite formation in mortars and Concretes Subjected to heat treatment". Concrete Durability, SP100 ACI, Detroit, pp. 2059-2071, 1987.

- 15) Fu Y., Beaudoin J.J., "Mechanisms of delayed ettringite formation in Portland systems". ACI Materials Journal, Vol 93, N°4, July-August 1996. pp 327-333.
- 16) Fu Y., Xie Ping, Gu Ping, Beaudoin, J.J. "Effect of temperature on sulphate adsorption / desorption by tricalcium silicate hydrates". CCR, Vol. 24, N° 8 pp. 1428-1432, 1994.
- 17) Fu Y., Xie Ping, Gu Ping, Beaudoin, J.J., "Significance of pre-existing cracks on nucleation of secondary ettringite in steam cured cement paste". C.C. R., Vol. 24, N° 6, pp. 1015-1024, 1994.
- 18) Marusin S.L., "A simple treatment to distinguish alkali-silica gel from delayed ettringite formation in concrete". Magazine of concrete research, Vol 46 N°168 pp. 163-166. Sep. 1994.
- 19) Shayan A., Quick G.W., "Microscopic features of cracked and uncracked concrete railway sleepers". ACI Materials Journal, Vol 89, N°4, pp. 348-361, July-August 1992.
- 20) Batic O.R., Cortelezzi C., Pavlicevic R., Traversa L.P., "Características tecnológicas de las areniscas del Chaco", XII R. T. AATH, La Plata. pp 191-197. 1995.

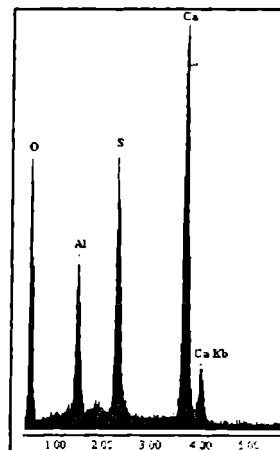
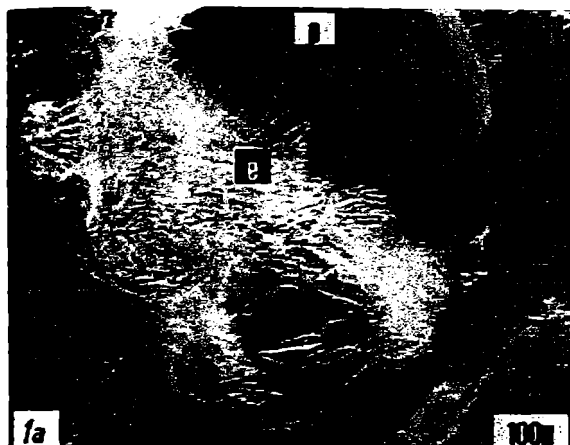


Figura 1a: Fotomicrografía de SEM. Cavityd rellena con ettringita (e), asociada con portlandita (p).

Figura 1b: EDAX correspondiente a la ettringita (e) de la figura 1a.

Figura 1: Probeta patrón con cemento portland normal (P1)



Figura 2: Probeta prefisurada (PF), con cemento ARI (e): ettringita.

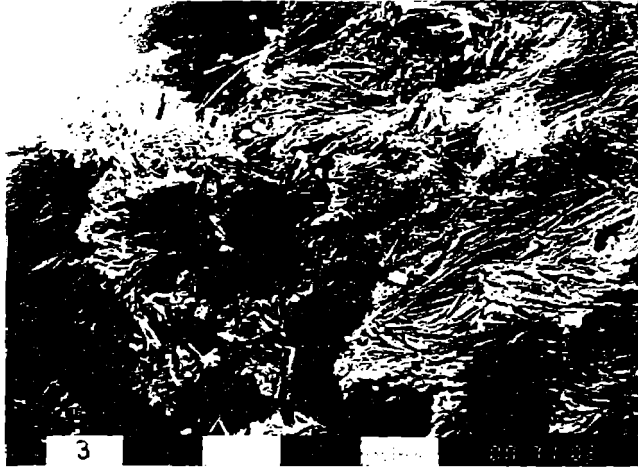


Figura 3: Ettringita masiva en probeta CD con cemento normal (x3000, 10 micrones)

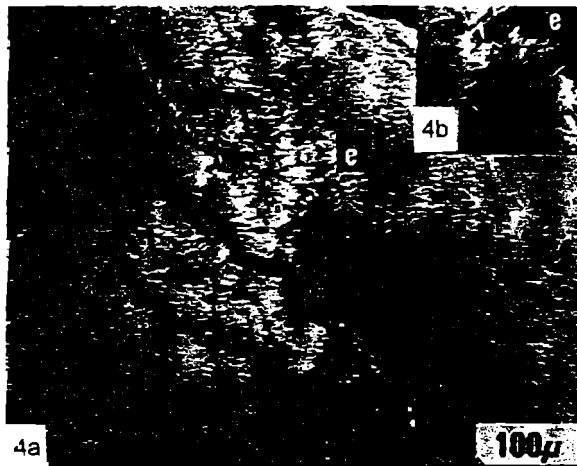


Figura 4a. Probeta HS, con cemento normal. Cavity rellena con ettringite (e).

Figura 4b. Detalle de la anterior.

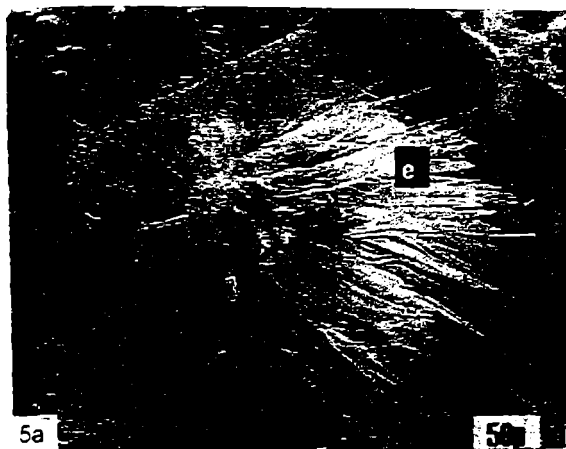


Figura 5a Fotomicrografía por SEM de ettringita (e).

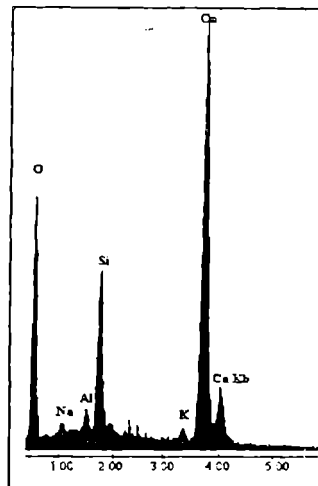


Figura 5b. EDAX del material que cubre los clastos de arenisca. Adjudicado a ceolita. Si = silicio.

Figura 5: Probeta RAS, con cemento de ARI (RAS2)